

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže**

**Mechanismy tvoření povrchu při obrábění kulovou
frézou**

**A Study of the Surface Scallop Generating Mechanism in
the Ball-End Milling Process**

**Student:
Vedoucí bakalářské práce:**

**Jan Doubravský
Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Doubravský

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Mechanismy tvoření povrchu při obrábění kulovou frézou
A Study of the Surface Scallop Generating Mechanism in the Ball-End
Milling Process

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu frézování tvarových ploch.
2. Problematika tvorby povrchu při obrábění.
3. Vliv náklonu nástroje na tvorbu povrchu při frézování.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] CHEN, J. S.; HUANG, Y. K.; CHEN, M. S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) p. 1077–1084, 2005.
- [2] MIZUGAKI, Y.; HAO, M.; KIKKAWA, K. Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling, *Annals of the CIRP* 50 (1), 2001.
- [3] MIZUGAKI, Y.; KIKKAWA, K.; TERAL, H.; HAO, M. Theoretical estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and tool orientation in ball-nosed end milling, *Annals of the CIRP* 52 (1), 2003.
- [4] SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému-Disertační práce*. Ostrava : Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

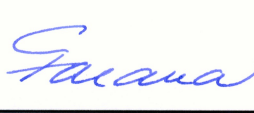
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011

..... Jan Dabráň
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ведоми, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ведоми, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Doubravský

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bludovská 32, Šumperk

Anotace bakalářské práce

DOUBRAVSKÝ, J. Mechanismy tvoření povrchu při obrábění kulovou frézou : bakalářská práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 36 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Tato bakalářská práce na téma „Mechanismy tvoření povrchu při obrábění kulovou frézou“ se bude snažit popsat průběh tvorby ploch při obrábění kulovou frézou a její vliv na drsnost povrchu. V první části je popsán aktuální stav technologií frézování v průmyslu. V další části je samotný popis tvorby ploch a její vliv na drsnost povrchu. V poslední části je popsán vliv náklonu nástroje na tvorbu ploch.

Annotation of bachelor thesis

DOUBRAVSKÝ, J. A Study of the Surface Scallop Generating Mechanism in the Ball-End Milling Process : Bachelor thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machinig and Assembly, 2011, 36 p. Thesis head: Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

This Bachelor thesis on „A study of the Surface Scallop Generating Mechanism in the Ball-End Milling Process“ will try to describe the process of surface creation with ball-end mill and its influence on surface roughness. The first part describes the current state of the milling in industry. The next part is the description of the surface creation with ball-end mill and its influence on surface roughness. A final section describes the influence of inclination on the surface creation.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek.....	7
Úvod.....	8
1 Přehled současného stavu frézování tvarových ploch.....	9
1.1 Používané stroje.....	9
1.2 Používané nástroje.....	10
1.3 Generování trajektorií v CAM systémech.....	11
2 Problematika tvorby povrchu při obrábění.....	14
2.1 Mechanismus tvorby povrchu při obrábění kulovou frézou.....	17
2.2 Matematický model.....	19
2.3 Počítačová simulace a porovnání s experimenty.....	22
3 Vliv náklonu nástroje na tvorbu povrchu při obrábění.....	26
4 Závěry pro realizaci v praxi.....	32
5 Poděkování.....	33
6 Seznam použitých pramenů.....	34
7 Seznam použitých obrázků.....	36

Seznam použitých symbolů a značek

Značení	Význam	Jednotka
a_p	Axiální přísuv nástroje	[mm]
C_1	Bod na břitu který je ještě v záběru s obrobkem	
CAD	Computer Aided Design	
CAM	Computer Aided Manufacturing	
CNC	Computer Numeric Control	
d	Průměr nástroje	[mm]
d_{eff}	Skutečný (efektivní) průměr frézy	[mm]
f	Posuv na zub	[mm]
h	Výška nerovnosti	[mm]
L_n^m	Trajektorie n-tého břitu v m-té dráze	
n	Otáčky nástroje	[1·min ⁻¹]
p	Krok frézy	[mm]
R, r	Poloměr nástroje	[mm]
$V_{c,eff}$	Skutečná (efektivní) řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_f	Rychlost posuvu v dráze řezu	[m·min ⁻¹]
α_0	Počáteční uhel břitu na počátku m-té dráhy řezu	[°]
β_n	Vyklonění nástroje	[°]
η	Poměr posuvu na zub / krok frézy	[1]
θ	Vyklonění nástroje	[°]
ω	Otáčky nástroje	[1·min ⁻¹]
α, β	úhly linie břitu od Oc do C1	[°]
X_c, Y_c, Z_c	Souřadný systém nástroje	
S_x, S_y, S_z	Souřadnice bodu C1	
X_w, Y_w, Z_w	Souřadnice bodu C1 s relativním pohybem ve směru posuvu	

Úvod

V dnešní době konkurenceschopnost firmy udává i schopnost uplatnit stále novější technologie. Snažíme se snížit výrobní čas, zlepšit kvalitu námi nabízeného výrobku anebo ušetřit na údržbě zvyšováním životnosti nástrojů. Technologie, která takové zefektivnění zajistí je i vysokorychlostní obrábění. Při konvenčním obrábění jsou posuvy na zub velice malé a proto nerovnosti vzniklé posuvem byly většinou ignorovány. Při vysokorychlostním obrábění však posuvy dosahují téměř stejných hodnot jako krok frézy a tudíž jsou jedním z činitelů drsnosti na obrobené ploše.

Tato práce uvádí teoretický model, simulaci a potvrzení pokusy představené vědci J. S. Chenem, Y. K. Huangem a M. S. Chenem, popisující tvorby povrchu a popis drsnosti vzniklé při obrábění kulovou frézou vysokorychlostním obráběním. Parametry, jako jsou poloměr nástroje, poměr posuv/krok frézy, počáteční úhel bříty při vstupu nástroje do záběru a náklon nástroje, byly studovány a experimentálně ověřeny. Výsledky analýz se téměř shodují s výsledky naměřenými z experimentů. To dokazuje, že zde představený model může přesně předpovídat výšku nerovností vzniklých ve směru kroku frézy i výšku nerovností ve směru posuvu na zub. Bylo zjištěno, že při vysokorychlostním obrábění jsou nerovnosti vzniklé posuvem na zub mnohem více důležité při celkové drsnosti povrchu než nerovnost vzniklá krokem frézy. V případech vysokých posuvů může být výška nerovností vzniklá posuvem třikrát až čtyřikrát větší než výška nerovností vzniklá krokem frézy. Také bylo zjištěno, že výška nerovností vzniklá posuvem frézy je velice citlivá na vyklonění nástroje vůči povrchu obrobku a výška nerovností vzniklá ve směru posuvu se hodně sníží již při velice malých náklonech. Obecně lze říci, že náklon nad 10° je dostatečný pro snížení drsnosti pro nástroj většiny průměrů.

1 Přehled současného stavu frézování tvarových ploch

1.1 Používané stroje

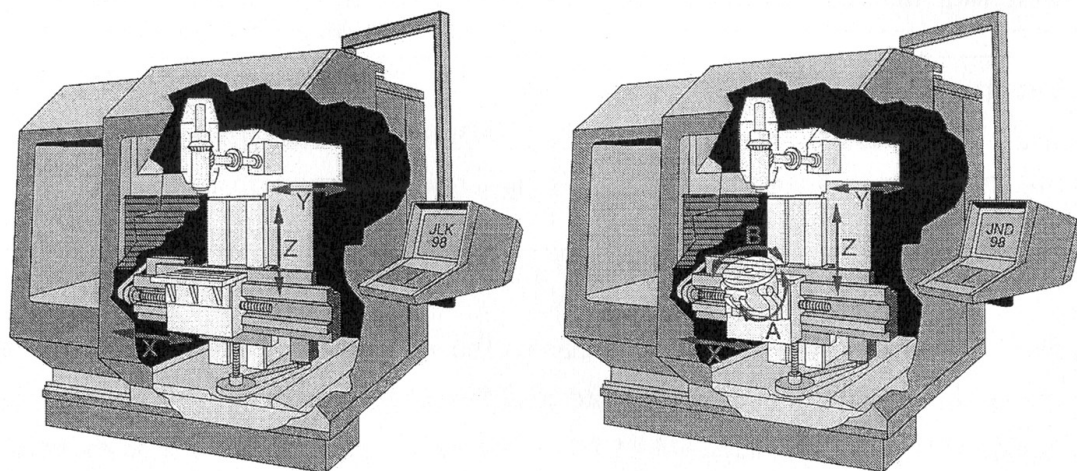
Pro výrobu tvarových ploch se používají číslíkově řízené frézky tříosé nebo pětiosé. Tříosé frézky lze použít k opracování tvarových ploch, avšak nelze u nich dostatečně pružně nastavit vyklonění nástroje. Proto budeme uvažovat nad pětiosými frézovacími centry, které nám umožní se zabývat drsností povrchů, které nejsou ovlivněny schopnostmi samotného frézovacího centra.

Pětiosé frézovací centrum je vybaveno zařízením, které zajistí nastavení obrobku vůči nástroji pěti různými pohyby, z toho třemi translačními a dvěma rotačními.

Aplikací pětiosého obrábění se dvěma rotačními osami pro vyklonění nástroje nebo využitím náklonu obrobku, lze docílit efektivní obrobení zakřiveného povrchu při využití efektivního rádia nástroje. Metodou pětiosého obrábění zakřiveného povrchu stopkovou frézou s rádiem v rohu vzniká lepší drsnost povrchu, větší přesnost a v neposlední řadě se zkracuje celkový čas obrábění. Pětiosé obrábění umožňuje pro optimalizaci obrábění stopkovou frézou s rádiem v rohu kontinuálně regulovat naklápění nástroje s respektováním obráběného povrchu. Krok nástroje je generován pro specifickou výšku výstupků (nerovnosti ve směru kolmém na posuv) s ohledem na co nejnižší hustotu těchto kroků. Standardní procedury pro tříosé obrábění jsou nahrazovány mnohem dokonalejšími speciálními programy pro pětiosé obrábění, které dosahují vysoké kvality povrchu optimalizací směru řádkování a vysoké produktivity optimalizací prostorového sklonu osy nástroje pro daný sklon obráběného povrchu.[1]

Při využití tříosého obrábění křivkového tvaru mělké kapsy je zapotřebí mnohem většího množství přejezdů pro dosažení požadovaného povrchu než při použití pětiosého frézování. Díky kontinuálnímu regulování naklápění nástroje, které umožňuje pětiosé obrábění, bylo dosaženo snížení strojního času s respektováním požadované drsnosti.[1]

Důležitým cílem racionálního obrábění forem je optimalizace drah nástroje při dokončování povrchu z hlediska dosažení jeho nejvyšší kvality a eliminace dalších operací, jako jsou elektrojiskrové obrábění, dobrušování, leštění, nebo ruční dokončování.[1]



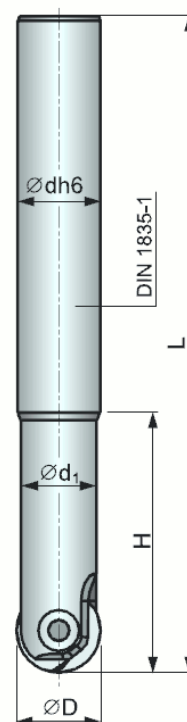
Obrázek č. 1: Frézovací centrum tříosé a pětiosé [1]

1.2 Používané nástroje

Nástroje užívané při frézování mají mnoho různých tvarů a jsou určeny pro navržené účely.

Kopírovací frézy

Kopírovací frézy nejsou určeny pro jeden konkrétní tvar, jako třeba frézy drážkovací nebo frézy na ozubená kola, jsou navrženy pro obrábění komplexních tvarů. Používají se například pro obrábění lisovacích forem, které mají většinou konkávní tvar a nebo modelů, které mají naopak konvexní tvar. Mezi kopírovací frézy se řadí kulové frézy, které jsou stěžejním tématem této práce.



Zvýšení účinnosti stopkových fréz [1]:

- používat největší možný průměr nástroje,
- zajistit odvod třísek - procesní kapalina, stlačený vzduch,
- volit nejmenší vzdálenost mezi upínacím pouzdrem a břitem nástroje,
- při hrubování, dát přednost souslednému frézování,

Obrázek č. 2: Stopková fréza s kulovou hlavou [17]

- při upínání nástrojů dodržet čisté upínací plochy,
- překontrolovat vůli v uložení vřetene,
- používat frézy s velkou nestejnou roztečí zubů za účelem zamezení vzniku vibrací,
- překontrolovat, do jaké míry je nástroj schopen pracovat s šikmým zajištěním do materiálu obrobku,
- při velkém vyložení nástroje zvolit malý průřez třísky a velký posuv; zvážit možnost použití držáků nástrojů, opatřených tlumičem vibrací,
- pro obrábění dobře obrobitelných materiálů používat frézy s velkým úhlem stoupání šroubovice,
- dle možností používat vyměnitelné břitové destičky s pozitivní geometrií břitu,
- dle možností používat povlakované druhy slinutých karbidů.

1.3 Generování trajektorií v CAM systémech

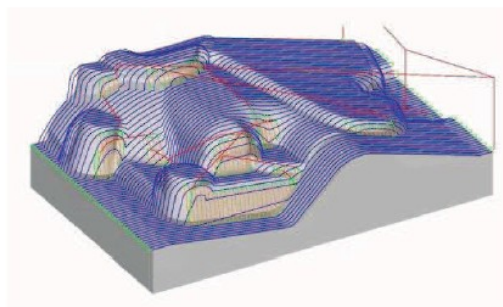
Vytvoření trajektorie vhodné pro nástroj je nezbytným prvkem moderního CNC obrábění. Je to zároveň prvek, u kterého se dá nejvíce zefektivnit výroba produktu. Výběrem vhodné strategie se dá zrychlit výroba, zlepšit povrch obrobku a nebo zlepšit životnost nástroje.

Generování trajektorie pro kulovou frézu se skládá z několika kroků. V prvním kroku se zjistí, jaké plochy nástroj bude obrábět. V druhém kroku se u nástroje zjistí poloha referenčního bodu nástroje a poloha jeho břitu. V případě kulové frézy je odřezávána myšlená koule, která je tvořena rotujícím břitem kruhového tvaru. Referenční bod nástroje je nejvhodněji nastaven tak, že je ve středu této myšlené koule. Vzdálenost referenčního bodu k jakémukoli bodu břitu je konstantní a tudíž bude mít kruhový úběr materiálu, ať už se nástroj pohybuje jakýmkoli směrem. V třetím kroku se vytvoří ekvidistantní plocha k ploše, kterou obrábíme, jejichž vzdálenost je rovna vzdálenosti referenčního bodu nástroje k jeho břitu. Poté se do ekvidistantní plochy promítne určitý vzor trajektorie, který je nejvhodnější pro náš obrobek.

Existuje mnoho strategií generování trajektorie, mezi nejznámější patří tyto:

Řádkování

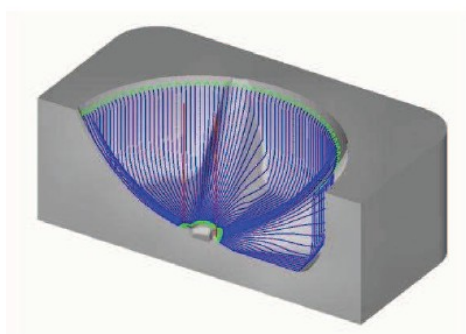
Řádkování je jedna z nejpoužívanějších dokončovacích strategií. Vnikne tak, že se v rovině XY vytvoří trajektorie, která je v jednom směru sama na sebe rovnoběžná a promítne se do ekvidistantní plochy obráběného povrchu, tudíž nám bude ve směru Z kopírovat obráběný tvar.



Obrázek č. 3: Řádkování [3]

Paprsky

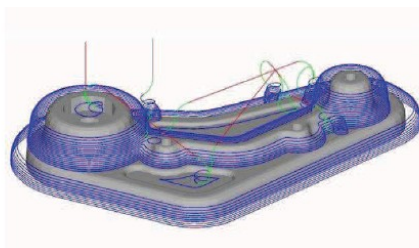
Paprsky slouží k optimálnímu obrobení kruhovitých tvarů. Střed obrobku bývá vynechán z důvodu přehuštění drahami.



Obrázek č. 4: Paprsky [3]

Constant Z

Constant Z je trajektorie tvořená tak, že ve směru Z se postupně posunuje o určitou kontantu a ve směrech XY je vygenerován vždy obrys obráběného tvaru.

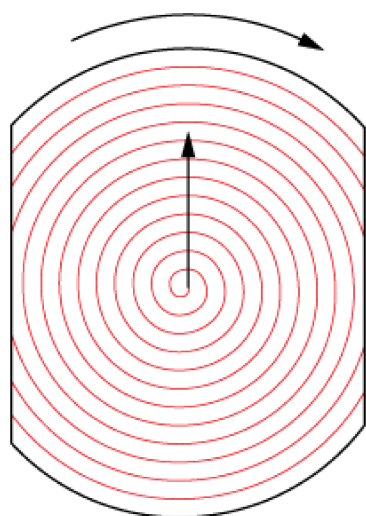


Obrázek č. 5: Constant Z [3]

Námi použitý matematický model v této práci popisuje tvorbu ploch při obrábění kulovou frézou při obráběcí strategii řádkování a v případech, kdy fréza jednotlivé trajektorie prochází pouze jedním směrem (obrázek č. 6). Jedná se o neefektivní využití času avšak významné zjednodušení vzorců tohoto matematického modelu.

Tento matematický model má za úkol popsat tvorbu výšky nerovností při vysokorychlostním obrábění.

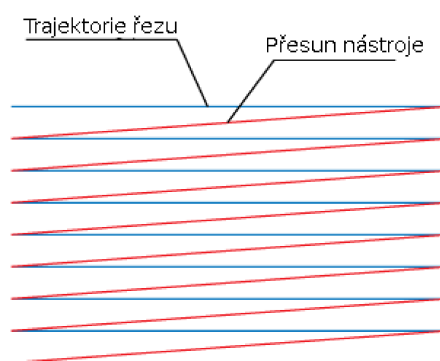
V nejjednodušším případě výpočtu, pokud uplatníme



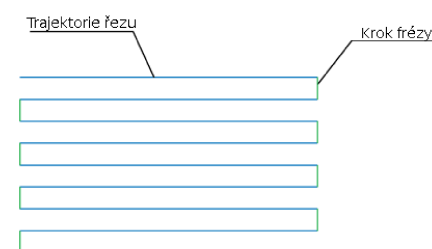
Obrázek č. 8: Trajektorie ve tvaru spirály [16]

jinou strategii obrábění, bude tento matematický model platit také, avšak bude nutné do něj zahrnout i takové parametry,

jako tvar trajektorie (v našem případě jde o přímky). Také v tomto případě lze jednoduše zjišťovat vstupní úhel břitu, což třeba při frézovací strategii, která vede nástroj ve spirále, nelze, neboť na sebe navazující dráhy jsou kontinuální (obr. č. 8).



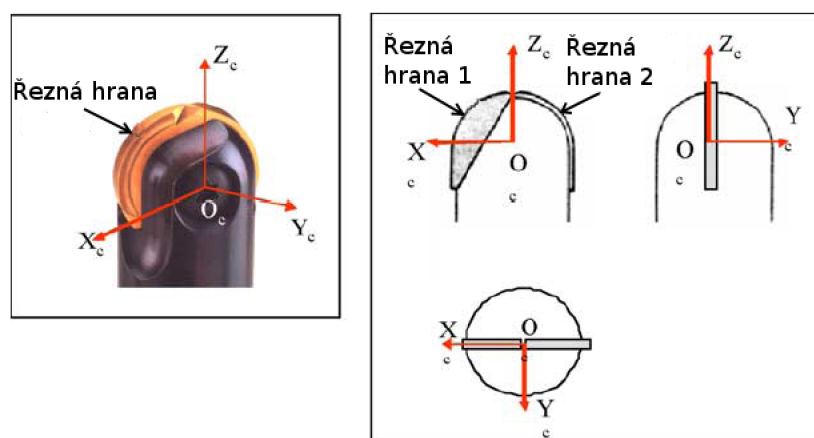
Obrázek č. 6: Jednosměrné řádkování [16]



Obrázek č. 7: Obousměrné řádkování [16]

2 Problematika tvorby povrchu při obrábění

Dnešní trendy při výrobě forem vedou k vysoce kvalitnímu zpracování povrchu pomocí vysokorychlostní technologie. Jakost obrobeného povrchu, povrchová úprava a zkreslení obráběného výrobku po vysokorychlostním obrábění je mnohem lepší než při použití tradičního frézování. Cílem je, aby nerovnost při frézování byla co nejmenší nebo byla úplně odstraněna. Tvarový povrch se v průmyslu většinou opracovává pomocí frézy

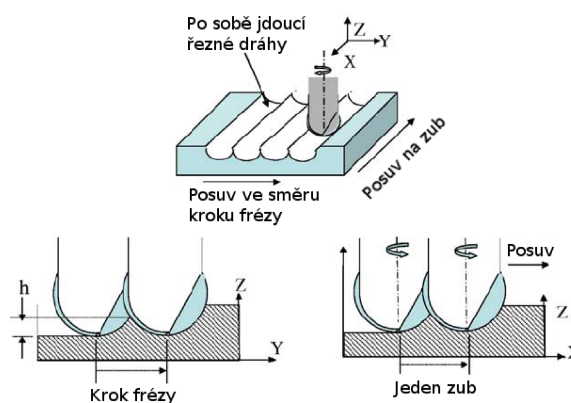


Obrázek č. 9: Geometrie a souřadnicový systém frézy s kulovou hlavou [2]

s kulovým čelem – viz. obrázek 9. Takováto úprava povrchu vyžaduje konstrukci posoupných řezných drah oddělených pravidelnou vzdáleností (zvanou krok frézy). Ve směru každé dráhy řezu je pravidelně měněna poloha řezné hrany během rotace frézy. Díky geometrickému tvaru a dynamickým změnám kruhových břitů je generována nerovnost ve směru kroku frézy a nerovnost ve směru dráhy řezu tvořená úběrem materiálu při posuvu na zub. Pravidelná nerovnost ve směru kroku frézy je tvořena hloubkou řezu a vzdáleností odstupu mezi jednotlivými řeznými drahami, zatímco nerovnost ve směru dráhy řezu je tvořena pravidelným odřezáváním materiálu jednotlivými po sobě jdoucími zuby nástroje.[2]

Za účelem dosažení vysoce kvalitní úpravy povrchu musí být generování nerovností při frézování dobře kontrolované. Vickers a Quan [12] vyjádřili výšku nerovnosti ve směru kroku frézy jako funkci zakřivení konvexních nebo konkávních povrchů, poloměru břitu

a krokem frézy. Kruth a Klewais [13] rozšířili předchozí matematický model generování výšky nerovností o náklon nástroje. Přesto předchozí studie popisovaly pouze stav, kdy nástroj a materiál jsou vůči sobě pouze v translačním pohybu, tj. břit kulové frézy nerotoval, pouze se souběžně posuoval. V těchto případech tedy nástroj za sebou zanechával drážky s válcovým tvarem. Tyto matematické modely počítaly ve výsledku pouze předpokládanou výšku nerovnosti ve směru kroku frézy. Model popisující tvorbu nerovnosti při obrábění kulovou frézou je mnohem komplikovanější, protože orientace břitu se dynamicky a periodicky mění během rotace. Nerovnosti nejsou tedy tvořeny pouze krokem frézy ale i posuvem na zub. [2]

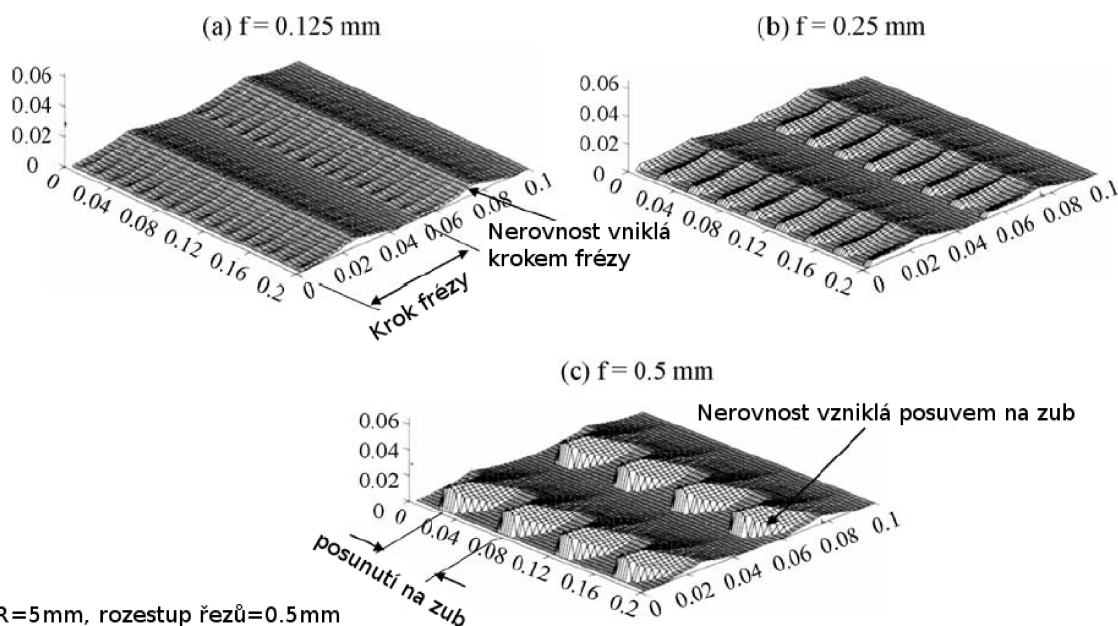


Obrázek č. 10: Znázornění nerovností vzniklých posuvem řezů a posuvem na zub [2]

Úběr materiálu při posuvu na zub je při konvenčním frézování nesrovnatelně menší než úběr materiálu při kroku frézy. Obecně platí, že při frézování je poměr posuvu na zub s krokem frézy nižší než jedna třetina. Proto byl v předchozích pracích kladen důraz na studium geometrického mechanismu tvorby povrchu krokem frézy, zatímco nerovnosti vzniklé posuvem na zub byl většinou ignorován. V dnešním vysokorychlostním obrábění je zub frézy vyhotoven buď ze slinutých karbidů nebo je tvořen destičkami ze slinutých karbidů. Takový materiál zvládne vysoké namáhání potřebné k vysokorychlostnímu obrábění a tudíž se posuv na zub zvýšil na stejnou úroveň jako je krok frézy. Podle experimentálních pozorování je při vysokorychlostním obrábění drsnost povrchu třikrát až čtyřikrát větší než předpoklad vycházející z předchozích matematických modelů postavených pouze na kroku frézy.[2]

Mizugake, Hao a Kikkawa [5] předložili nový geometrický model pro odhadování povrchu po frézování, kdy byla brána na zřetel dynamika rotace bříty při obrábění kulovou frézou. Prostřednictvím simulace, kterou vytvořili, zjistili, že při vysokorychlostním obrábění nerovnosti vzniklé posuvem na zub (viz. obrázek 11) mohou být významně větší než nerovnosti vzniklé krokem frézy. Jejich práce stanovila teoretická hlediska, která vysvětlují výsledky předchozích experimentů. Mizugake, Kikkawa, Terai a Hao [4] rozšířili tento model o vliv náklonu osy nástroje. Všimli si, že nerovnosti ve směru dráhy řezu se tímto prudce snižují.[2]

Vzhledem k tomu, že řezná rychlost ve středu kruhového bříty je rovna nule, dochází



Obrázek č. 11: Nerovnosti vzniklé krokem frézy a posuvem na zub [2]

k nekvalitnímu obrábění povrchu obrobku a tím, i k většímu opotřebení nástroje. Po přihlédnutí ke sklonu osy nástroje, při zpracování normálního povrchu, může být zamezeno stavu nulové rychlosti bříty. Dvě další studie [14,15] uvádí, že sklon nástroje v rozmezí 10 až 20° představuje optimální obráběcí strategii pro vysokorychlostní frézování pro průmyslové prostředí.[2]

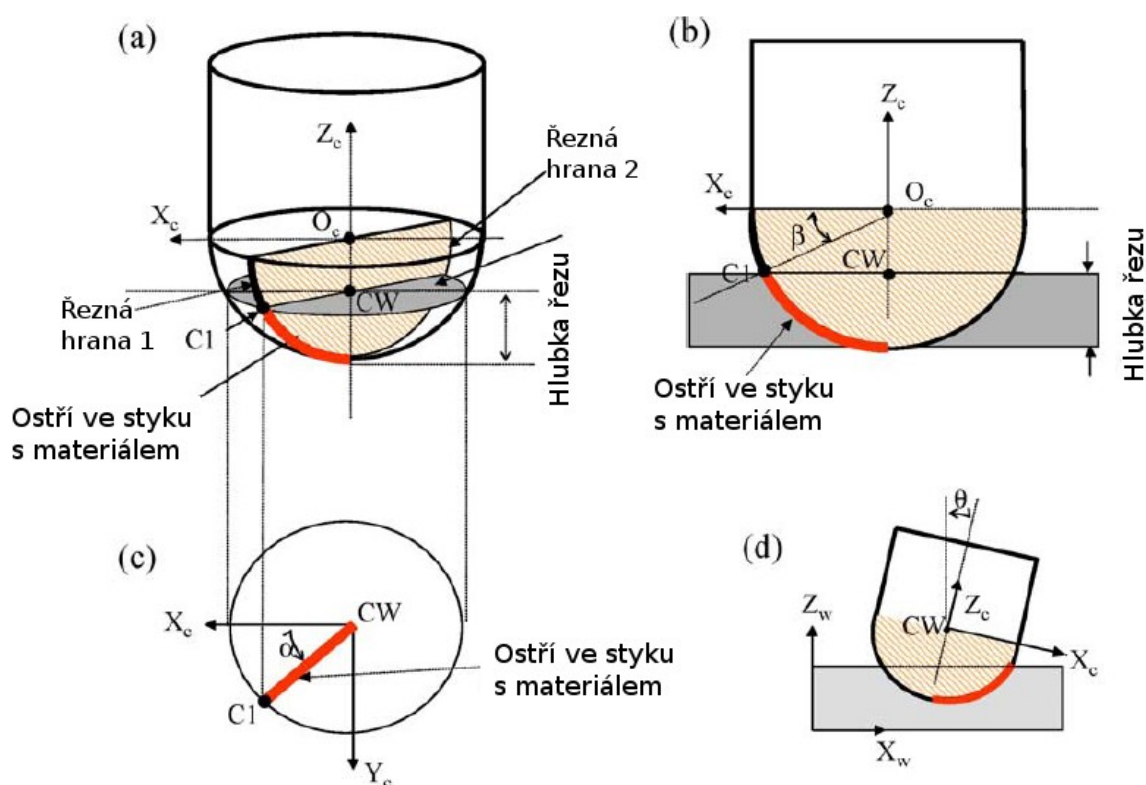
Z uvedených literatur lze dojít k závěru, že drsnost povrchu při vysokorychlostním obrábění je obzvláště citlivá na úběr způsobený posuvem na zub a náklon při obrábění

kulovou frézou. Nicméně, stále neexistuje model popisující tvorbu povrchu pro vysokorychlostní obrábění. Tato práce představuje model, který popisuje a předpovídá geometrickou tvorbu povrchu se zohledněním kroku frézy a posuvem na zub. Parametry, jako je poloměr nástroje, poměr rozteče drah s posuvem na zub, prvotní vstupní úhel břitu frézy a sklon osy, byly studovány a experimentálně ověřeny. [2]

2.1 Mechanismus tvorby povrchu při obrábění kulovou frézou

Nerovnosti kroku frézy a posuvu na zub při obrábění

Na obrázku č. 9 je znázorněn prostorový pohled a promítnutí břitu s kulovou hlavou se dvěma přímými zuby. Pro frézování s kulovou hlavou se proces obrábění skládá z po sobě jdoucích paralelních drah řezu oddělených o konstantní vzdálenost. Konstanta mezi



Obrázek č. 12: Znázornění styku břitu s materiálem [2]

následnými drahami je zvána „krok frézy“. Jak je znázorněno na obr. č. 10, díky sférické geometrii je krok frézy pozorován mezi po sobě následujícími drahami. Krok frézy u fré-

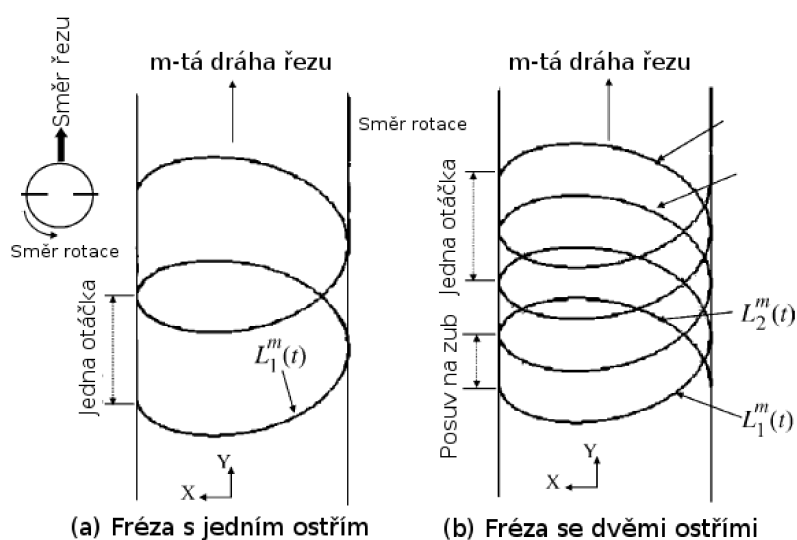
zování je jednoduše formován pevnou, stacionární geometrií břitu s kulovou hlavou. Je třeba dodat, že pro krok frézy se předpokládá, že břit s kulovou hlavou je v koordinovaném posunu s obráběnou částí. Pro rovnou plochu je výška nerovnosti ve směru

$$\text{kroku frézy vyjádřena takto: } h = \frac{p^2}{8 \cdot r} \quad (2.1)$$

kde:	h	výška nerovnosti	[mm]
	p	velikost kroku frézy	[mm]
	r	poloměr nástroje	[mm]

Pokud frézování s kulovou hlavou probíhá podél dráhy řezu, orientace břitu je tím dynamicky a periodicky měněna během rotace. Díky prostorovému tvaru kulového břitu je tak generován i jiný druh úběru materiálu - ve směru posuvu na zub mezi po sobě jdoucími úběry zubů. Ten je znázorněn na obr. č. 10. Na první pohled to vypadá, že mechanismus generování tvaru při úběru materiálu na zub vypadá téměř stejně jako při úběru ve směru kroku frézy. Je však třeba dodat, že odebraný materiál ve směru kroku frézy je jednoduše definován geometrickým tvarem břitu s kulovou hlavou a translačním pohybem, avšak na obr. č. 10 se břit nástroje otáčí. Proto je dynamický pohyb a rotace v pohybu břitů zohledňován při analyzování nerovnosti ve směru pohybu na zub při obrábění.[2]

Obecně vzato, úběr zubu při obrábění s kulovou hlavou je nízký (přibližně 0,1-0,2mm), přičemž krok frézy je nesrovnatelně vyšší (přibližně 0,5-1mm). V nejběžnějších případech je poměr kroku frézy s posuvem na zub pod jednou třetinou. Trend výroby tvarových ploch se však ubírá směrem k vysokorychlostní strojní technologii se záměrem omezit nutné následné úpravy obrobku.



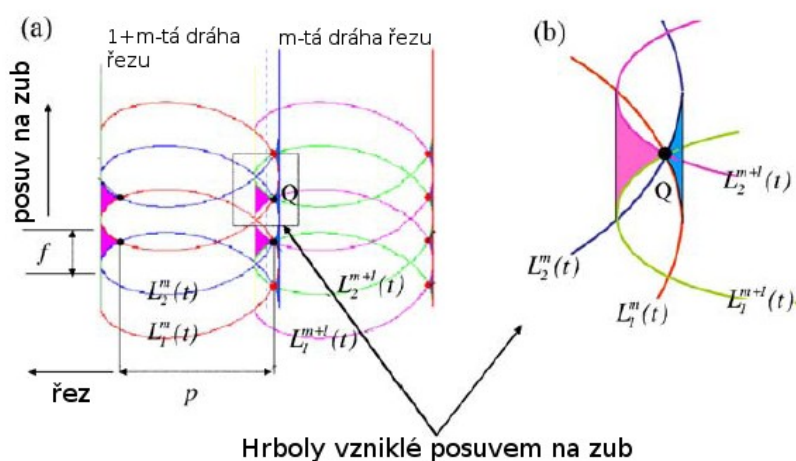
Obrázek č. 13: Trajektorie břitu jedno- a dvou- zubým nástrojem [2]

Užití vysokorychlostního obrábění umožňuje zvýšit počet drah nástroje a proto i redukovat krok frézy, a tím redukovat výšku nerovnosti vzniklé krokem frézy, bez zvýšení času potřebného pro samotnou výrobu tvarové plochy. Pro dnešní nejlepší ultra-vysokorychlostní technologii výroby se snižuje krok frézy na 0,1-0,3mm. Poměr rozteče drah s posuvem na zub je průměrně roven hodnotě $\eta=1$. Obrázek č. 11 ukazuje výsledky simulace pro stavy: $\eta=1/4$, $1/2$ a 1 . Při $\eta=1$ je výška nerovností při úběru materiálu ve směru na zub přibližně rovna trojnásobku výšce nerovnosti vzniklé ve směru kroku frézy. Je nutno poznamenat, že nerovnost vzniklá ve směru posuvu na zub je umístěna jinak než nerovnost vzniklá ve směru kroku frézy. Na rozdíl od kroku frézy, kde nerovnost je symetrická, je ve směru posuvu na zub asymetrická.[2]

2.2 Matematický model

Matematický popis břitu

Souřadný systém (X_c , Y_c , Z_c) s původním O_c je stanovený pro břit s kulovou hlavou a dvěma břity – viz. obrázek č. 12, který je přiřazen k břitu 1 a břitu 2. Pro danou hloubku řezu je kulový břit částečně ponořen do materiálu. Místo částečného dotyku břitu je uvedeno jako bod C1. Úhly linie od O_c po C1 jsou stanoveny jako α a β (viz. Obr. č. 12b a 12c). Koordináty bodu C1 založeny na souřadném systému (X_c , Y_c , Z_c) mohou být popsány jako:



Obrázek č. 14: Popis hrbolů vzniklých posuvem na zub [2]

$$CI_c = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_c = \begin{Bmatrix} R \cos \beta \cos \alpha \\ R \cos \beta \sin \alpha \\ R \cos \beta \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

kde: R je rádius břitu s kulovou hlavou [mm]

α, β jsou úhly linie břitu od Oc do C1 [°]

Z toho vyplývá, že fréza s kulovou hlavou se pohybuje podél řezných drah s rychlostí posuvu v_f na m -té dráze řezu. Pak jsou obecné koordináty bodu C1 relativní k obecnému souřadnému systému nástroje (X_w, Y_w, Z_w):

$$CI_w(t) = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{Bmatrix}_c + \begin{Bmatrix} V_f t \\ mp \\ 0 \end{Bmatrix}_w = \begin{Bmatrix} V_f t + R \cos \beta \cos(\alpha_0 + \omega t) \\ mp + R \cos \beta \sin(\alpha_0 + \omega t) \\ R \cos \beta \end{Bmatrix}_w \quad (2.3)$$

kde: α_0 počáteční úhel linie břitu na počátku m -té dráhy řezu [°]

v_f rychlost posuvu v dráze řezu [m/min]

p krok frézy [mm]

ω otáčky nástroje [1/min]

Pokud je nástroj nakloněn o nějaký relativní úhel vůči kolmici vetknuté do obráběné plochy, koordináty budou následné:

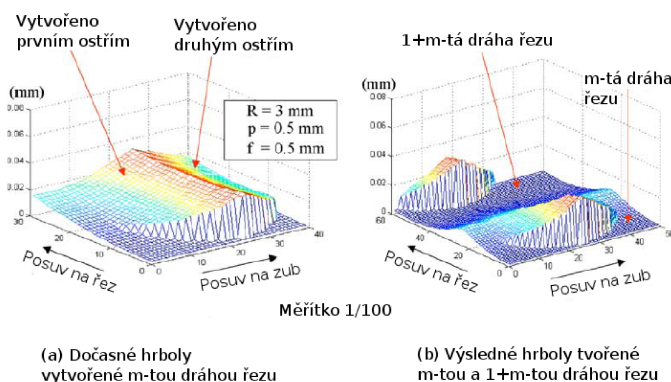
$$CI'_w(t) = \begin{Bmatrix} V_f t \\ mp \\ 0 \end{Bmatrix}_w = \begin{bmatrix} \cos \Theta & 0 & \sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} R \cos \beta \cos(\alpha_0 + \omega t) \\ R \cos \beta \sin(\alpha_0 + \omega t) \\ R \cos \beta \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

kde: Θ je úhel mezi osou nástroje a kolmicí vetknutou do obráběné plochy.[2]

Trajektorie břitu

Obr. č. 13 zobrazuje simulaci, jejímž výsledkem je trajektorie

L_1^m , kterou vykonává bod C1 v řezné dráze m , při pohledu na plochu X-Y. Dodejme, že břit nástroje se zároveň posouvá a rotuje, proto jím vytvořená plocha není symetrická (znázorněno na obr. č. 13).



Obrázek č. 15: Simulace vytvoření hrbolů [2]

Když se kulový břit pohybuje v m -té dráze řezu, materiál bude odříznut pohybem břitu

1 a 2. Pokud je břit 1 vepředu a břit 2 za ním, bude materiál odříznut 1. břitem a poté za sebou doříznut 2. břitem. Na obr. č. 13b je trajektorie 2. břitu znázorněna jako L_2^m . Zbývající materiál bude navíc doříznut 1. a 2. břitem v následující řezné dráze. V jediném bodě povrchu bude tedy materiál odříznut čtyřnásobně (tedy trajektoriemi břitu L_1^m , L_2^m , L_1^{m+1} a L_2^{m+1}) ze dvou řezných drah (viz. Obr. 14a). Tvarová nerovnost ve směru posuvu na zub bude tímto tvořena tedy zbývajícím materiálem ze dvou posloupných řezných drah. Barevné oblasti zobrazují umístění úběru řezných drah. Zvětšený graf úběru je na obr. č. 14b. Obrázek č. 15 je prostorovým náhledem na úběr materiálu z počítačové simulace.[2]

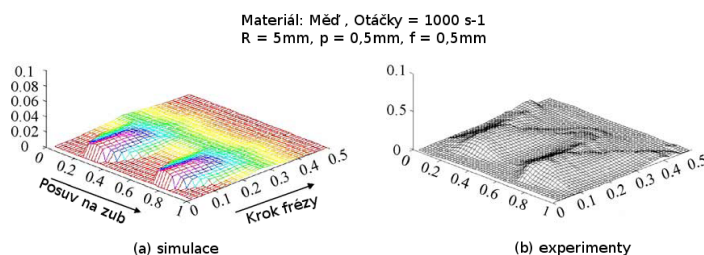
Determinace výšky úběru materiálu na zub

Díky tomu, že nerovnost ve směru kroku frézy je tvořena jednoduchou geometrií kulového břitu, můžeme ke zjištění výšky nerovnosti použít výše uvedený vzorec. Nicméně, výška nerovnosti ve směru posuvu na zub je generována dynamickým pohybem a sounáležitostí několika po sobě jdoucích řezných trajektorií. Neexistuje lepší způsob vysvětlení tohoto procesu.[2]

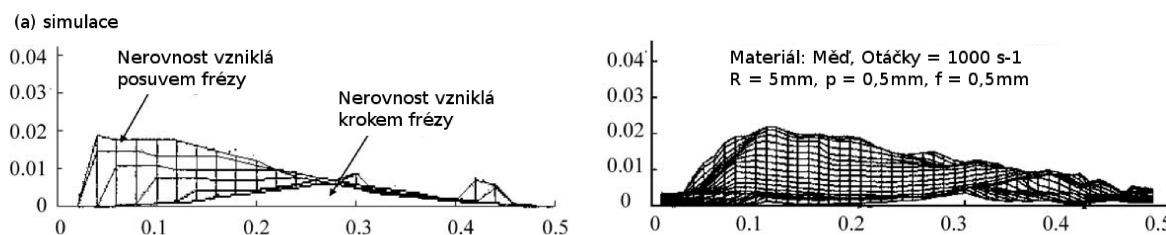
Další numerická metoda je v této analýze: jak je zřejmé z obr. č. 14, výška nerovnosti v bodě Q závisí na čtyřech řezných procesech, ve čtyřech různých polohách nástroje a čtyřech časech (na čase závisí poloha ostří při

rotaci). Tudíž musí platit podmínka, že: $L_1^m(t_1) = L_2^m(t_2) = L_1^{m+1}(t_3) = L_2^{m+1}(t_4)$ (2.5)

Kde t_1 , t_2 , t_3 a t_4 reprezentují různé doby čtyř břitů, které se dostanou do bodu Q a t_1, t_2, t_3 a t_4 jsou v nelineární rovnici a mohou být dále zjištěny numerickou analýzou při použití Newton-Raphsonovou iterační metodou.[2]



Obrázek č. 16: 3D profily - simulace, experiment [2]



Obrázek č. 17: Řez nerovnostmi - simulace, experiment [2]

2.3 Počítačová simulace a porovnání s experimenty

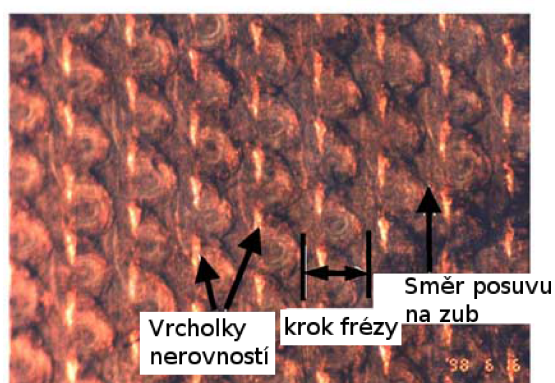
Vliv změny posuvu na zub

Simulace různých posuvů na zub s parametry $R=5\text{mm}$ a $p=0,5\text{mm}$ jsou k vidění na obrázku č. 11. Na nich je vidět, že při vyšším poměru posuvu na zub ku kroku frézy, tedy hodnotě η , nerovnost vzniklá posuvem na zub a působí mnohem větší drsnost výsledného povrchu než nerovnost vzniklá krokem frézy. Výška nerovnosti způsobené posuvem může být v případě $\eta=1$ až třikrát větší než výška nerovnosti ve směru kroku frézy. Lze si povšimnout, že nejvyšší nerovnost posuvu na zub je téměř v místě nejnižší nerovnosti způsobené krokem frézy. Na obr. č. 16 můžeme porovnat prostorový povrch vzniklý

Materiál: Měď, otáčky = 1000 s⁻¹
 $R = 5\text{mm}$, $p=0,5\text{mm}$, $f = 0,5\text{mm}$,
 náklon nástroje = 0°



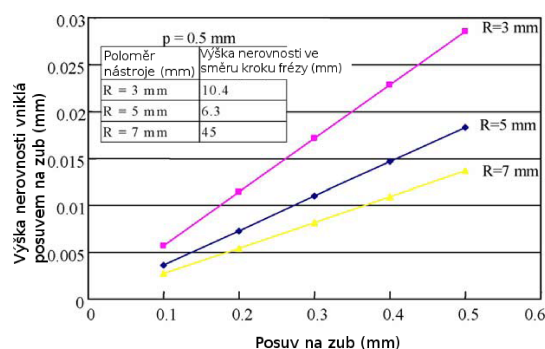
(a) $f = 0.25\text{ mm}$



(b) $f = 0.5\text{ mm}$

Obrázek č. 18: Fotografie obrobené plochy [2]

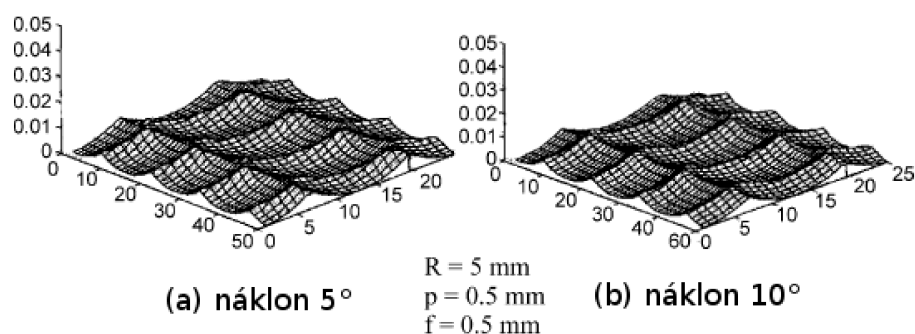
simulací a experimentem. Obrázek č. 17 ukazuje řezy provedené zmíněnými povrchy. Hodnoty a prostorový povrch ze simulace se téměř shoduje s provedenými experimenty. Snímky pořízené po opracování obrobku jsou k vidění na obr. č. 18. Nerovnosti vzniklé posuvem na zub jsou na nich zvýrazněny. Poloměr bříty nástroje hraje taky svou roli. Vliv poloměru nástroje je na obr. č. 19.[2]



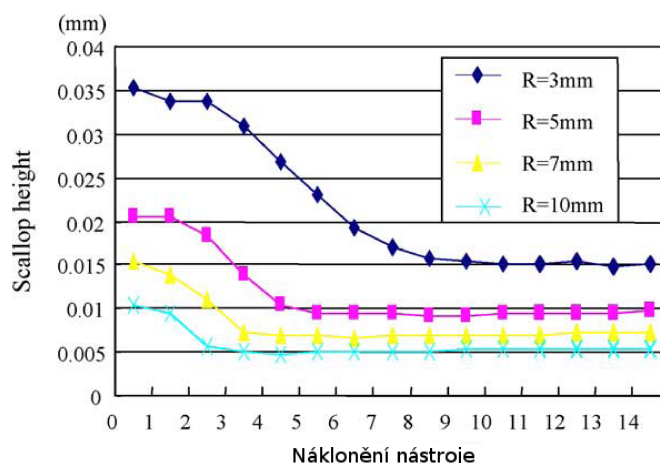
Obrázek č. 19: Vliv poloměru nástroje [2]

Vliv naklonění nástroje

Vykloníme-li osu nástroje vůči obráběné ploše, místo s nulovou řeznou rychlostí nebude v kontaktu s obráběnou plochou. Navíc se nám sníží nerovnost vniklá posuvem na zub. Výška nerovností ve směru posuvu na zub byla simulována a změřena. Výsledek je na



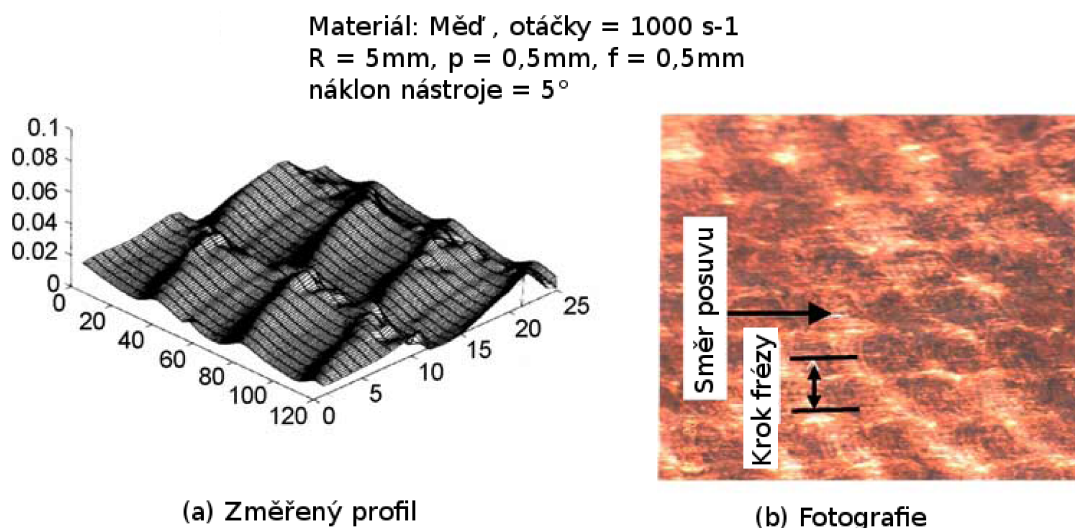
Obrázek č. 20: Prostorový pohled na profil povrchů při náklonu nástroje 5° a 10° [2]



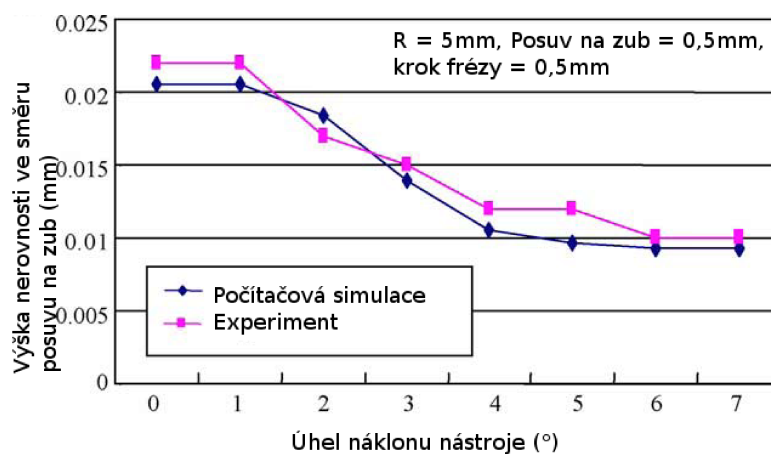
Obrázek č. 21: Vliv náklonu nástroje [2]

obrázku č. 21. Výška nerovnosti se snižuje se zvyšujícím se úhlem naklonění nástroje, avšak po určitém úhlu se výška nerovnosti ustálí a dále se nezvyšuje. Na jaké hodnotě se ustálí, závisí na poloměru nástroje. Na obrázku č. 20 jsou vidět výsledky simulace náklonu nástroje 5° a 10° , znázorněné v prostoru. Můžeme pozorovat, že nad 5° náklonu výrazně přispěje ke snížení nerovnosti ve směru posuvu na zub, drsnost povrchu a je tvořena převážně nerovnosti vzniklou krokem frézy, která je nezávislá na náklonu nástroje. Obrázek č. 22 ukazuje změřený profil povrchu a fotografii obrobené plochy s náklonem nástroje 5° . Srovnání mezi simulací a měřením z experimentů při různých úhlech náklonu

nástroje jsou na obrázku č. 23. Tyto výsledky více potvrzují správnost našeho matematického modelu.[2]



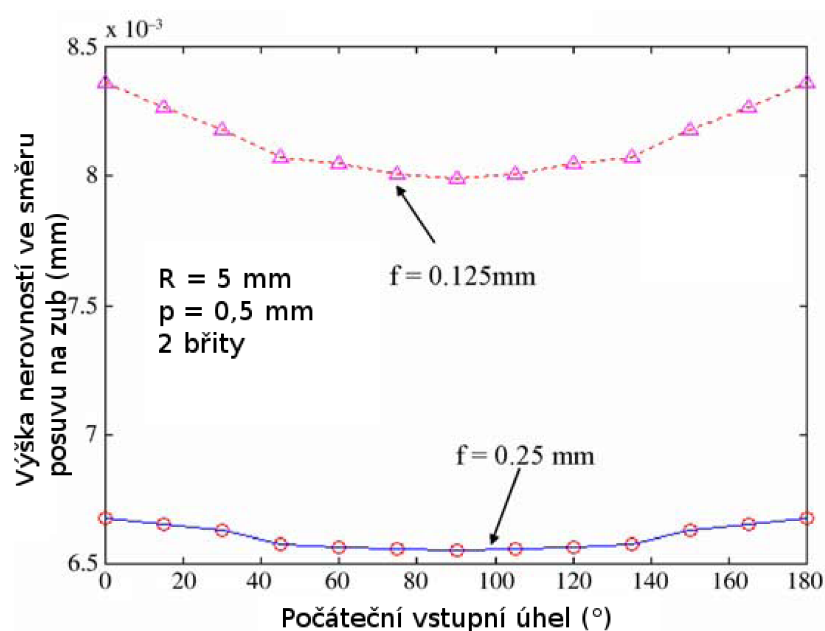
Obrázek č. 22: Profil povrchu obrobené plochy (Náklon nástroje = 5°) [2]



Obrázek č. 23: Skutečné hodnoty pro různé náklony nástroje [2]

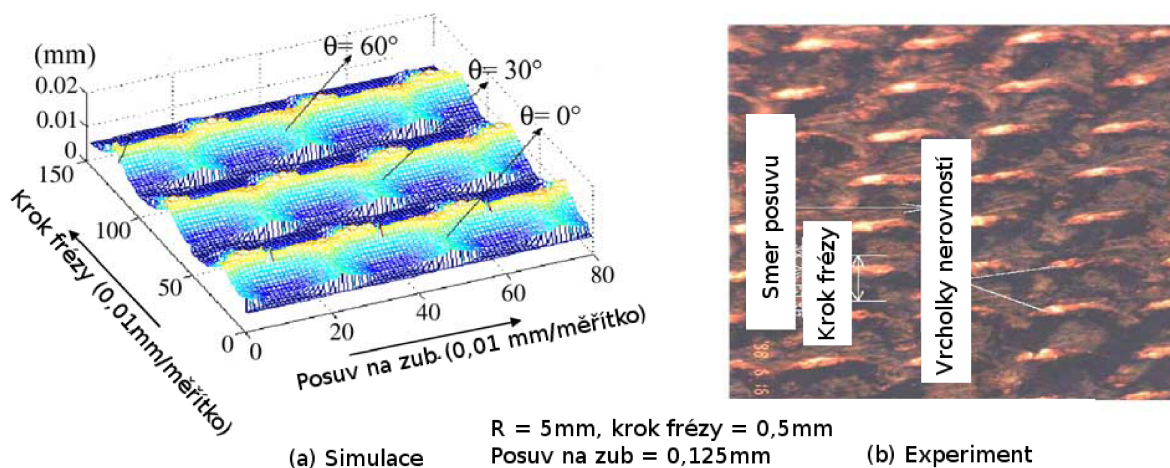
Vliv vstupního úhlu nástroje

Počáteční úhel rotace α_0 nástroje v bodě vstupu do záběru při každé dráze řezu, z rovnic (2.3) a (2.4), hraje také úlohu v tvorbě nerovností ve směru posuvu. Výsledky simulace



Obrázek č. 24: Výška nerovností v závislosti na počátečním vstupním úhlu [2]

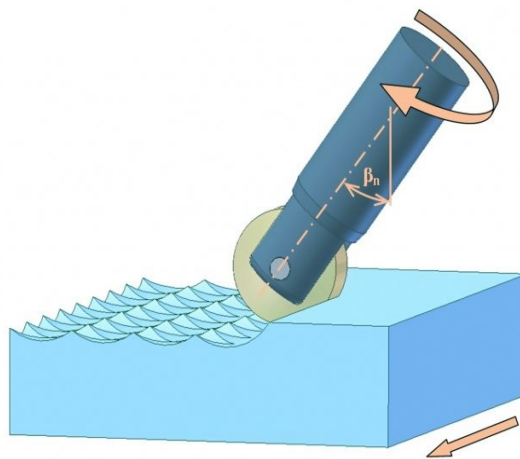
různých počátečních úhlů jsou k vidění na obrázku č. 24. Bylo zjištěno, že vstupní úhel nástroje nemá velký vliv na výšku nerovnosti, ale pouze na její polohu. Výsledky porovnané s experimenty jsou na obrázku č. 25.[2]



Obrázek č. 25: Profil nerovností v závislosti na počátečním vstupním úhlu nástroje [2]

3 Vliv náklonu nástroje na tvorbu povrchu při obrábění

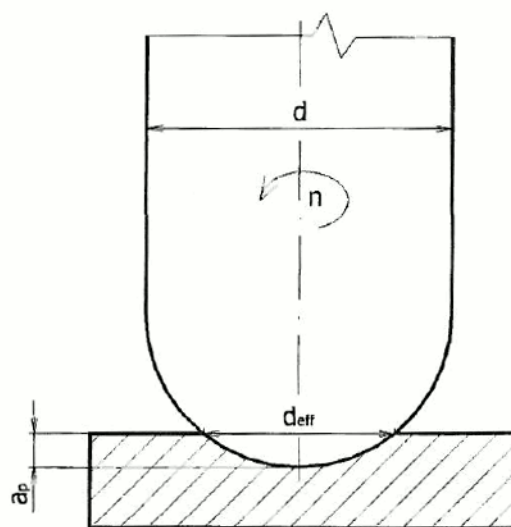
Během standardního frézování kulovými frézami, kdy materiál a nástroj svírají pravý úhel, je na kulovém ostří v ose frézy nulová řezná rychlost. V tomto bodě nástroj pouze zatlačuje materiál obrobku. Dochází zde k nežádoucím vlivům, jako je přechování třísky, zvyšování teploty řezání nebo zvýšená tvorba nerovností. Tyto vlivy mají za následek zhoršení kvality povrchu obráběného materiálu a snížení trvanlivosti nástroje. Může dojít až k jeho vyštípnutí. Aby se těmto jevům předešlo, doporučuje se při obrábění nástroj nebo obrobek naklopit.[1]



Obrázek č. 26: Vykloněný nástroj v kontaktu s obrobkem [1]

Zvýšení normálového napětí je následkem sklonu osy nástroje oproti normále k povrchu ve směru posuvu. Případný boční příklon nástroje k dosud neobrobenému povrchu při řádkování přináší útlum samobuzených kmitů a zvýšení produktivity obrábění až na 300% původních hodnot. Sklon nástroje má tedy stabilizující účinky, za které může efektivní tlumení samobuzeného kmitání svojí příznivou směrovou orientací, při které v nástroji převládají tahové síly a při které má náhodné zvýšení síly řezání za následek odklon nástroje od obráběného materiálu. Vliv sklonu nástroje je v tomto případě rozhodující, neboť je v něm při malém poloměru soustředěna téměř veškerá prostorová poddajnost řetězce „toku síly“ od nástroje k obrobku.[1]

Úhel naklopení nástroje od normály k povrchu obrobku se používá v rozmezí 10 až 30°.



Obrázek č. 27: Nástroj bez náklonu [1]

Obr. č. 27 znázorňuje polohu nástroje tříosého obráběcího centra, u něhož není možnost naklonění vřetene $\beta_n = 0$ [°]. Zde se podstatně snižuje efektivní průměr frézy d_{eff} , zvláště při malých hloubkách řezu a_p , a tím také efektivní řezná rychlost. [1]

Efektivní průměr frézy bez vyklonění nástroje:

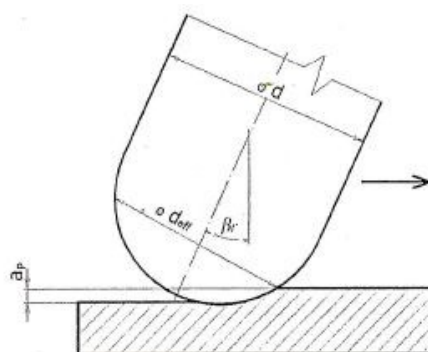
$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (d - a_p)} \quad (3.1)$$

Kde : a_p – axiální přísuv nástroje [mm]

d – průměr frézy [mm]

d_{eff} – skutečný (efektivní) průměr frézy [mm]

Pomocí naklonění nástroje se změní efektivní průměr frézy a tím i výsledná skutečná řezná rychlost. Také se zlepší i jakost povrchu a životnost nástroje. Velmi důležitý je směr posuvu nástroje. Pokud je způsob posuvu nástroje označován jako tažený, viz. Obr. č. 28, má nástroj tišší chod a zlepšuje se i povrch obráběného materiálu oproti způsobu označovaného jako „tlačný“, viz. obr. č. 29. Také použití sousledného či nesousledného způsobu frézování má na jakost povrchu a životnost nástroje velký vliv.[1]



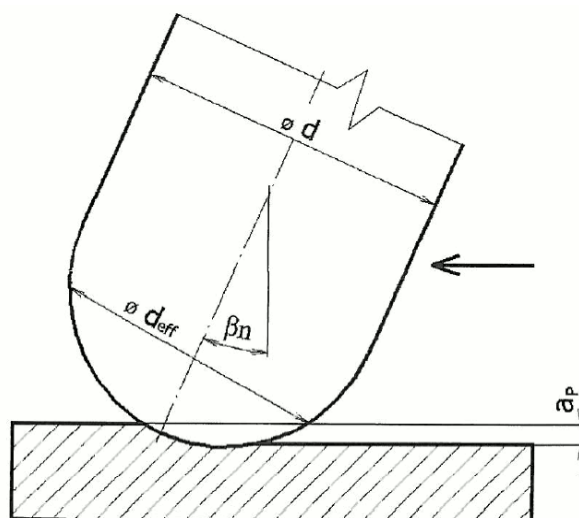
Obrázek č. 28: Efektivní průměr frézy při frézování taženým nástrojem [1]

Výpočet efektivního průměru frézy při frézování taženým nástrojem:

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) + \beta_n \right] [mm] \quad (3.2)$$

Kde:

a_p – axiální přísuv nástroje	[mm]
β_n – úhel náklonu nástroje	[°]
d – průměr frézy	[mm]
d_{eff} – skutečný (efektivní) průměr frézy	[mm]



Obrázek č. 29: Tlačený nástroj při naklopení kulové frézy [1]

Výpočet efektivního průměru frézy při frézování tlačným nástrojem:

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) - \beta_n \right] [mm] \quad (3.3)$$

Kde: a_p – axiální přísuv nástroje [mm]
 β_n – úhel náklonu nástroje [°]
 d – průměr frézy [mm]
 d_{eff} – skutečný (efektivní) průměr frézy [mm]

Výpočet efektivní řezné rychlosti:

$$v_{c, eff} = \frac{\pi \cdot n \cdot d_{eff}}{1000} [m \cdot min^{-1}] \quad (3.4)$$

Kde: $v_{c, eff}$ – skutečný (efektivní) průměr frézy [mm]
 n – otáčky frézy [1]
 d_{eff} – skutečný (efektivní) průměr frézy [mm]

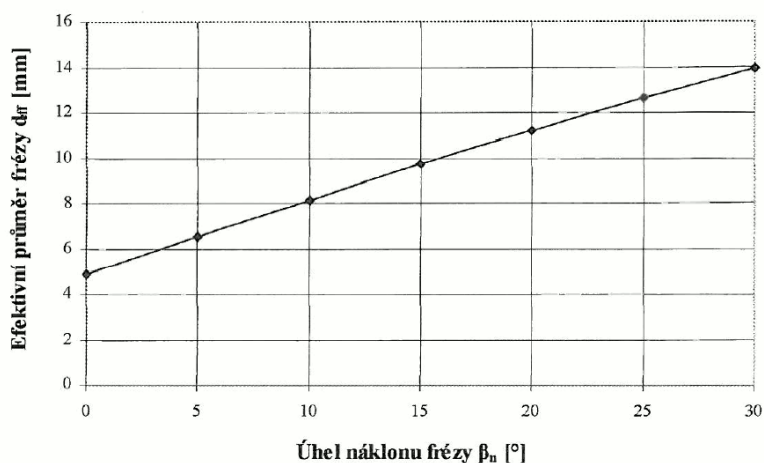
Třiosé obráběcí centrum s možností naklopení čtvrté osy či pětiosé obráběcí centrum, u kterého je možné naklonění vřetena, umožňuje efektivnější frézování při malých průměrech frézy.[1]

Z výše uvedených vzorců vyplývá, že při použití náklonu frézy roste skutečný (efektivní) průměr frézy d_{eff} , a proto i skutečná (efektivní) řezná rychlost $v_{c, eff}$. [1]

Konkrétní příklad ukazuje tabulka a následně graf na obr. č. 30. Hodnoty závislosti jsou při efektivním průměru frézy d_{eff} , skutečné řezné rychlosti $v_{c, eff}$ na úhlu naklonění frézy β_n při frézování kulovou frézou průměru $d = 20$ mm, hloubky řezu $a_p = 0,2$ mm a otáčkách vřetene $n = 2500$ ot·min⁻¹. Kde, pro srovnání, na průměru $d = 20$ mm řezná rychlost dosahuje velikosti $v_c = 157$ m·min⁻¹, při daných otáčkách $n = 2500$ ot·min⁻¹. [1]

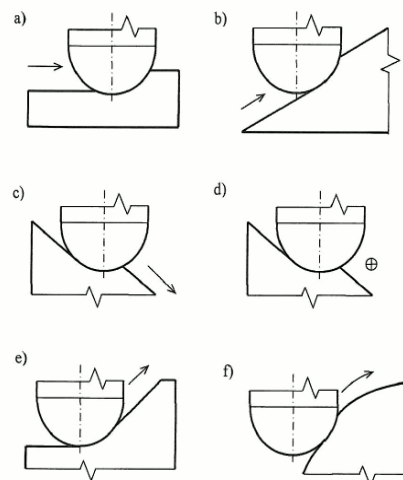
β_n	d_{eff}	$V_{\text{c,eff}}$
[°]	[mm]	[m·min ⁻¹]
0	4,86	38,19
5	6,53	51,32
10	8,16	64,06
15	9,72	76,32
20	11,2	88
25	12,61	99
30	13,91	109,25

Závislost efektivního průměru frézy d_{eff} na úhlu náklonu frézy β_n pro: $d=20$ mm, $a_p=0,3$ mm, $n=2500$ ot/min



Obrázek č. 30: Závislost efektivního průměru frézy na úhlu náklonu frézy [1]

Při frézování složitějších tvarových ploch na sebe navazují jednotlivé případy frézování základních tvarů součásti, viz. obrázek č. 31. Pro udržení stále stejného úhlu naklopení nástroje od kolmice k obráběnému povrchu je nutné v některých případech použití víceosého frézování. V těchto případech již nevystačíme obrábět ve třech osách současně spolu s indexovaným naklopením čtvrté osy.[1]



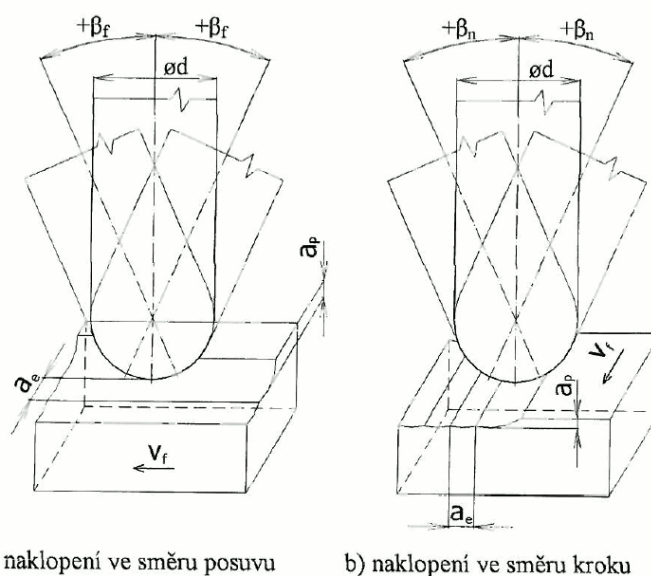
Obrázek č. 31: Příklady obrábění kulovou frézou [1]

Důležitou částí víceosého obrábění jsou strategie řízení náklonu osy nástroje, jako jsou například:

- definovaný prostorový vektor,
- předklon ve směru pohybu a boční výklon, jeden z úhlů může být variabilní v definovaném rozsahu,
- osa procházející bodem,
- osa procházející přímkou,
- interpolace mezi definovanými vektory,
- čtyřosá strategie, kdy jedna osa je blokována.

Je zde optimalizovaný úhel v závislosti na křivosti plochy - adaptivní náklon dovoluje maximální úběr materiálu, zvýšení kvality povrchu a redukci obráběcího času. Doplnění úhlových NC os A a B je možno realizovat natáčením vřeteníku, natáčením obrobku nebo rozdělením natáčení mezi vřeteník a obrobek. Realizace

dvouosého natáčení vřeteníku je účelná hlavně u strojů s velmi rozměrnými nebo protáhlými obrobky, jejichž umístění na otočném a sklopném stole není reálné. Pro HSC aplikace je třeba naklápět integrované vřeteno jako celek, nikoli přivádět pohyb k vřetenu přes naklápěcí kuželové převody. Gyroskopické efekty HSC vřeten a požadavky rychlého odstraňování třísek spíše mluví pro dvouosé natáčení obrobku upnutého na otočném stole. Velmi se rozšiřuje koncepce otočného stolu uloženého ve sklopné „kolébce“, která je využitelná v kombinaci s vertikálním i horizontálním vřetenem.[1]



Obrázek č. 32: Možnosti frézování naklopným nástrojem [1]

4 Závěry pro realizaci v praxi

Tato práce uvádí teoretický model, simulaci a potvrzení pokusy představené vědci J. S. Chenem, Y. K. Huangem a M. S. Chenem, popisující tvorby povrchu a popis drsnosti vzniklé při obrábění kulovou frézou vysokorychlostním obráběním. Parametry, jako jsou poloměr nástroje, poměr posuv/krok frézy, počáteční úhel břitu při vstupu nástroje do záběru a náklon nástroje, byly studovány a experimentálně ověřeny. Výsledky analýz se téměř shodují s výsledky naměřenými v experimentech. To dokazuje, že zde představený model může přesně předurčovat výšku nerovností vzniklých ve směru kroku frézy i výšku nerovností ve směru posuvu na zub. Bylo zjištěno, že při vysokorychlostním obrábění jsou vůči celkové drsnosti povrchu významnější nerovnosti vzniklé posuvem na zub než nerovnost vzniklá krokem frézy. V případech velmi vysokých posuvů může být výška nerovností vzniklá posuvem třikrát až čtyřikrát větší než výška nerovností vzniklá krokem frézy. Dále bylo také zjištěno, že výška nerovností vzniklých posuvem frézy je citlivá na vyklonění nástroje vůči povrchu obrobku. Výška nerovností vzniklých ve směru posuvu se sníží již při velice malých náklonech. Obecně lze říci, že náklon nad 10° je dostatečný pro snížení drsnosti pro nástroj většiny průměrů.

V současné době lze však tuto práci považovat pouze za úvod této problematiky. Její další rozšíření by mohlo být tématem budoucích výzkumů na katedře Obrábění a montáže Vysoké školy báňské Technické Univerzity Ostrava nebo i tématem navazující diplomové práce. V té by mohly být následně popsány aplikace vzorců uvedených v této bakalářské práci a to buď jako modulů CAM systémů nebo jako samostatného programu nezávislého na CAM systému. Tím by mohlo být více rozpracováno jejich využití při predikci drsnosti povrchu.

5 Poděkování

Dovoluji si poděkovat Ing. Markovi Sadílkovi Ph.D. za velmi cenné odborné rady a metodické vedení při psaní mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval ostatním pracovníkům Fakulty strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. V neposlední řadě si vážím podpory rodiny a přátel, kterou mi poskytovali během mého studia.

6 Seznam použitých pramenů

- [1] SADÍLEK, M. Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému – Disertační práce. Ostrava : Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 s., 23 příloh.
- [2] CHEN, J. S.; HUANG, Y. K.; CHEN, M. S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) s. 1077 – 1084, 2005.
- [3] MARTYNEK, R. Strategie obrábění tvarových ploch: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 35 stran. Vedoucí práce: Sadílek, M.
- [4] MIZUKAGI, Y.; KIKKAWA, K.; TERAL, H.; HAO, M. Theoretical estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and toolorientation in ball-end milling, *Annals of the CIRP* 52 (1), 2003.
- [5] MIZUKAGI, Y.; KIKKAWA, K.; HAO, M. Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling, *Annals of the CIRP* 50 (1), 2001.
- [6] ČERNOCH, Svatopluk. Strojně technická příručka. Jedenácté vydání. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1959. 1872 s.
- [7] ROČEK, Vladimír. Příručka obrábění. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1973. 228 s.
- [8] PŘIKRYL, Zdeněk; MUSÍLKOVÁ, Rosa. Teorie obrábění. Druhé vydání. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1975. 240 s.
- [9] BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; SADÍLEK, Marek; PETŘKOVSKÁ, Lenka; NOVÁKOVÁ, Jana. Nové směry v progresivním obrábění. Ostrava : Ediční středisko VŠB - TUO, 2007. 251 s.
- [10] ŘASA, Jaroslav; GABRIEL, Vladimír. Strojírenská Technologie 3 : Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1. díl. Druhé vydání. Praha : Scientia s.r.o., 2005. 256 s.

[11] ŘASA, Jaroslav; POKORNÝ, Přemysl; GABRIEL, Vladimír. Strojírenská Technologie 3 : Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. díl. Druhé vydání. Praha : Scientia s.r.o., 2005. 221 s.

[12] VICKERS, G. W.; QUAN, K. W. Ball-mills versus end-mills for curved surface machining, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry 111 (1989) 22-26.

[13] KRUTH, J. P.; KLEWAIS, P. Optimalization and dynamic adaptation of the cutter inclination during five-axis milling of sculptured surfaces, Annals of the CIRP 43 (4) (1994) 443-448

[14] SCHULZ, H.; HOCK, St. High-speed milling od dies and moulds-cutting conditions and technology, Annals of the CIRP 44 (1) (1995) 35-38

[15] KO, T. J.; KIM, H. S.; LEE, S. S.; Selection of the machining inclination angle in high-speed mall end milling, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 17 (2001) 163-170

[16] SolidCAM – Milling Help [online]. 2009 [cit. 2011-05-09]. Direction options. Dostupné z WWW: <http://www.kxcad.net/SolidCAM/SolidCAM_Milling_Help/hsm_link_common_direction.htm>.

[17] Pramet 2010 – Frézování – Katalog. Šumperk : Pramet, 2010. 305 s.

7 Seznam použitých obrázků

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Frézovací centrum tříosé a pětiosé [1].....	10
Obrázek č. 2: Stopková fréza s kulovou hlavou [17].....	10
Obrázek č. 3: Řádkování [3].....	12
Obrázek č. 4: Paprsky [3].....	12
Obrázek č. 5: Constant Z [3].....	13
Obrázek č. 6: Jednosměrné řádkování [16].....	13
Obrázek č. 7: Obousměrné řádkování [16].....	13
Obrázek č. 8: Trajektorie ve tvaru spirály [16].....	13
Obrázek č. 9: Geometrie a souřadnicový systém frézy s kulovou hlavou [2].....	14
Obrázek č. 10: Znázornění nerovností vzniklých posuvem řezů a posuvem na zub [2].....	15
Obrázek č. 11: Nerovnosti vniklé krokem frézy a posuvem na zub [2].....	16
Obrázek č. 12: Znázornění styku břitu s materiálem [2].....	17
Obrázek č. 13: Trajektorie břitu jedno- a dvou- zubým nástrojem [2].....	18
Obrázek č. 14: Popis hrbolů vzniklých posuvem na zub [2].....	19
Obrázek č. 15: Simulace vytvoření hrbolů [2].....	20
Obrázek č. 16: 3D profily - simulace, experiment [2].....	21
Obrázek č. 17: Řez nerovnostmi - simulace, experiment [2].....	21
Obrázek č. 18: Fotografie obrobene plochy [2].....	22
Obrázek č. 19: Vliv poloměru nástroje [2].....	22
Obrázek č. 20: Prostorový pohled na profil povrchů při náklonu nástroje 5° a 10° [2].....	23
Obrázek č. 21: Vliv náklonu nástroje [2].....	23
Obrázek č. 22: Profil povrchu obrobene plochy (Náklon nástroje = 5°) [2].....	24
Obrázek č. 23: Skutečné hodnoty pro různé náklony nástroje [2].....	24
Obrázek č. 24: Výška nerovností v závislosti na počátečním vstupním úhlu [2].....	25
Obrázek č. 25: Profil nerovností v závislosti na počátečním vstupním úhlu nástroje [2].....	25
Obrázek č. 26: Vykloněný nástroj v kontaktu s obrobkem [1].....	26
Obrázek č. 27: Nástroj bez náklonu [1].....	27
Obrázek č. 28: Efektivní průměr frézy při frézování taženým nástrojem [1].....	28
Obrázek č. 29: Tlačený nástroj při naklopení kulové frézy [1].....	28
Obrázek č. 30: Závislost efektivního průměru frézy na úhlu náklonu frézy [1].....	30
Obrázek č. 31: Příklady obrábění kulovou frézou [1].....	30
Obrázek č. 32: Možnosti frézování naklopeným nástrojem [1].....	31